

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Návrh technologie svařování svarového spoje z lité a
tvářené oceli

Technology Proposal for Welding Cast to Wrought Steel

Autor:

Petr Petr

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Petr**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Specializace: 70 Strojírenská technologie
Téma: **Návrh technologie svařování svarového spoje z lité a tvářené oceli**
Technology Proposal for Welding Cast to Wrought Steel

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii svařování uhlíkových ocelí
2. Navrhněte metodu svařování, přídavný materiál a parametry pro vybraný spoj z lité a tvářené oceli
3. Navrhněte experimentální zkoušky pro ověření vlastností svarového spoje
4. Provedte experimentální zkoušky
5. Vyhodnoťte

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Sondel, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011





prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....*17.4.2011*.....

..........
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne 17.04.2011



.....

Petr Petr

Jméno a příjmení autora práce: Petr Petr

Adresa trvalého pobytu autora práce: Skřipov 186, 747 45, Opava

Poděkování

Především chci poděkovat panu Ing. Martinu Sondelovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování mé bakalářské práce.

Anotace

Má práce je rozdělena na dvě části. První se zabývá možnostmi svařování uhlíkových ocelí. U uhlíkových ocelí jsem se zaměřil především na podmínky jejich svařitelnosti. V jednotlivých kapitolách jsou uvedeny předpoklady, které musí oceli určené ke svařování splňovat, jejich mezní hodnoty a normy, kterými se řídí tyto parametry. Dále je uveden seznam základních prvků ovlivňujících svařitelnost s uvedením jejich konkrétních vlivů. První část obsahuje také popis svařovací metody použité v praktické části a základní popis použitých zkušebních metod svarových spojů. Druhá část spočívá v návrhu svarového spoje lité a tvářené oceli. Obsahuje návrh přípravy svarových ploch, návrh technologie svařování, volbu přídavného materiálu a atmosféry včetně výpočtu nutnosti předehřevu a navržení dohřevu. Po provedení samotného svarového spoje byly navrženy a uskutečněny jak nedestruktivní, tak destruktivní zkoušky. Zkoušky byly provedeny a vyhodnoceny dle platných norem.

Klíčová slova

Svařitelnost, uhlíková ocel, litá ocel, tvářená ocel, předehřev, dohřev.

Summary

My work is divided into two parts. The first deals with the possibilities for welding carbon steels. For carbon steels, I focused mainly on the conditions of their weldability. The individual chapters present the assumptions that have to be welded steel meet the limit values and norms governing these parameters. The following is a list of basic elements affecting the weldability of their specific effects. The first section contains a description of the welding method used in the practical and basic description of the testing methods for welded joints. The second part consists in the design of weld joints of cast and wrought steel. It contains a proposal preparation weld area, welding technology, design, choice of filler material and atmosphere, including the calculation of the need of preheating and reheating design. After the weld itself was designed and implemented both nondestructive and destructive testing. The tests were performed and evaluated according to applicable standards.

Keywords

Weldability, carbon steel, alloy steel, wrought iron, preheating, reheating.

Seznam použitých zkratk:

A ₅	tažnost	[%]
C _E	ekvivalentní uhlík	[hm. %]
C _P	koeficient vlivu ekvivalentního uhlíku a tloušťky materiálu	
ČR	Česká republika	
ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
HB	tvrdost dle Brinella	
HD	difuzní vodík	[ml·100g ⁻¹]
HV	tvrdost dle Vickerse (zkouška je dána normou ČSN EN ISO 6507-1)	
I	proud	[A]
IIW	International Institut of Welding	
ISO	International Organization for Standardization	
KCV	nárazová práce u V vrubu	[J]
MAG	Metall Active Gas (svařování metodou 135)	
Q	teplo vnesené do svaru (tepelný příkon)	[kJ·mm ⁻¹]
Re	mez pevnosti v kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti v tahu	[MPa]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
U	napětí	[V]
Z	kontrakce	[%]
aj.	a jiné	
apod.	a podobně	
atd.	a tak dále	
atp.	a tak podobně	
např.	například	
s	tloušťka materiálu	[mm]
tj.	to je	
vč.	včetně	
η	koeficient tepelné účinnosti svařovací metody	

Obsah

1. Úvod a cíl práce	1
1.1 Úvod.....	1
1.2 Cíl práce	1
2. Svařitelnost ocelí.....	2
2.1. Parametry ovlivňující svařitelnost ocelí	3
3. Uhlíkové oceli	5
3.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí.....	5
3.2 Vliv chemického složení ocelí na jejich mechanické vlastnosti a svařitelnost dle jednotlivých prvků	5
3.2.1 Uhlík a jeho vliv na tvrdost svarového spoje.....	6
Uhlíkový ekvivalent.....	7
3.2.2 Další prvky výrazně ovlivňující svařitelnost	8
3.3 Předehřev svarového spoje	12
3.4 Dohřev svarového spoje.....	13
3.5 Svařování uhlíkových ocelí metodou 135	14
3.5.1 Princip metody	15
3.5.2 Volba ochranné atmosféry a její funkce	16
3.6 Příčiny vzniku vad ve svarových spojích	17
3.7 Zkoušky svarových spojů	18
4. Návrh a provedení svarového spoje.....	25
4.1 Charakteristika materiálů	26
4.2 Svařovací metoda.....	27
4.3 Přídavný materiál	28
4.4 Ochranná atmosféra	29
4.5 Příprava svarových ploch.....	29
4.6 Stanovení předehřevu	30
4.7 Provedení svaru.....	33
4.8 Použitý svařovací zdroj.....	35
5. Nedestruktivní zkoušky svarového spoje	36
5.1 Vizuální zkouška.....	36
5.2 Zkouška magnetická prášková.....	37
5.3 Zkouška ultrazvukem.....	38
6. Destruktivní zkoušky	39
6.1 Zkouška makrostruktury	39
6.2 Zkouška tvrdosti svarového spoje.....	40
6.3 Zkouška rázem v ohybu	42
6.4 Zkouška tahem	43
6.5 Zkouška lámavosti	44
7. Závěr	45
Seznam použité literatury:	47
Seznam obrázků, tabulek a grafů:	49

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

1.1 Úvod

Dnešní moderní doba, ve které si nedovedeme představit život bez techniky je pro nás samozřejmostí. Je třeba si však uvědomit, že veškerá ulehčení moderní doby nám utvářejí stroje. Stroje pro všemožné účely od těžby surovin, až po stroje vyrábějící jednotlivé konečné výrobky. Pokud chceme zachovat úroveň dnešní doby, nebo ještě lépe posunout se kupředu, musíme nutně tlačit na vývoj nových a efektivnějších zařízení. To se však neobejde bez neustálé obnovy a údržby zařízení stávajících.

Již zmíněná údržba, či vývoj se samozřejmě neobejdou bez spojení různorodých prvků, častokrát rozdílných materiálů. Ať už jde o šroubové, nýtované, pájené či svařované spoje. Ve svém budoucím profesním životě se chci zaměřit na hlediska technologičnosti těchto procesů, jejich zefektivňování či výzkum nových možností. Proto jsem na střední průmyslovou školu navázal studiem strojírenské technologie na Vysoké škole Báňské-Technické univerzitě Ostrava, kde jsem si vybral specializaci svařování. Odtud již jasně vyplývá oblast zájmu této bakalářské práce.

1.2 Cíl práce

Prvotním úkolem této práce je vysvětlit pojem svařitelnost a vytvořit základní pohled na svařitelnost uhlíkových ocelí, uvést podmínky, a možnosti tavného svarového spojení uhlíkových ocelí s různým obsahem uhlíku a jiných prvků. Avšak hlavní význam práce, tedy její opodstatnění spočívá v návrhu svarového spoje, který bude realizován, dále v návrhu nedestruktivních i destruktivních zkoušek tohoto spoje, a jejich vyhodnocení dle platných norem.

2. SVAŘITELNOST OCELÍ

Pojmem svařitelnost rozumíme mimořádně složitou vlastnost kovů a slitin, která souvisí s vlastnostmi základního svařovaného materiálu a svarového kovu, s použitými metodami svařování a jejich výrobními podmínkami. Nemalou roli zde hraje i konstrukce svařence. Nedostatečná svařitelnost se projevuje praskáním základního kovu v okolí svaru.

Definice svařitelnosti dle ISO:

“Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů na konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou.” [1]

Norma ČSN EN 1011, která se zabývá taktéž problematikou svařitelnosti ocelí vyjadřuje jako hlavní hlediska ovlivňující tuto vlastnost pět pojmů. Jsou to:

- návrh spoje
- vodíkem indukované praskání
- houževnatost a tvrdost tepelně ovlivněné oblasti
- krystalizační praskání
- lamelární praskání
- koroze

Když se ohlédneme do minulosti zjistíme, že tato problematika sahá do samých prvních počátků svařování materiálů. Mezinárodní svářečský ústav (IIS/IIW) řeší tuto problematiku už od dob svého vzniku a vydal celou řadu doporučení a norem, kde vyjadřuje minimální podmínky, kterým musí vyhovovat konstrukční oceli vhodné pro svařování.

2.1. Parametry ovlivňující svařitelnost ocelí

Základními parametry, jež mají vliv na svařitelnost ocelí se dělí do třech prvotních oblastí. Každá tato oblast obsahuje množství rozmanitých problematik a samotných procesů, které jsou okrajově uvedeny v následujícím rozdělení.[1]

Vlastnosti základního materiálu a svarového kovu ovlivňující svařitelnost ocelí: [10]

- chemické složení
- mechanické vlastnosti
- mikrostruktura
- absorpce plynů
- oxidační schopnost
- vlastnost a chování za vysokých teplot
- chování při rychlém ohřevu
- chování při velkých rychlostech ochlazování (kalitelnost)
- transformace struktury
- precipitační vytvrzování
- náchylnost na vznik trhlin
- metalurgické reakce mezi svarovým kovem a struskou, nebo ochrannou atmosférou

Vliv použité metody svařování a výrobních podmínek na svařitelnost ocelí: [10]

- tavné nebo tlakové svařování
- množství tepla vneseného do svarového spoje
- parametry svařování
- příprava a čistota svarových ploch
- dokonalost ochrany místa svaru

- průměry použitých přídavných materiálů
- přístup ke svaru
- poloha svaru
- předehřev svaru
- teplota Interpass
- tepelné zpracování
- prokovávání svarových housenek
- způsob kladení svarových housenek
- pořadí provádění svarů
- použití speciálních metod pro snížení zbytkových napětí

Vliv konstrukce svařence na svařitelnost ocelí: [10]

- počet svarů na konstrukci
- typy použitých svarů
- umístění svarů na konstrukci
- kumulace svarových spojů na konstrukci
- tloušťka svarových spojů
- tuhost svařované konstrukce
- zbytková napětí
- deformace svařence
- konstrukční vruby v blízkosti svarů
- náhlé přechody tloušťek v blízkosti svarů

3. UHLÍKOVÉ OCELI

3.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí

Uhlíkové oceli jsou dle původních ČSN norem zařazeny v třídách 10, 11 a 12. Dle ČSN EN 10027-1, což je norma zabývající se systémem označování, konkrétně stavbou značek ocelí, jsou tyto materiály řazeny do skupiny 1. Písmena a čísla jsou volena tak, aby vyjadřovala mechanické a fyzikální vlastnosti, chemické složení i oblast použití. Např. se používají symboly S, P, L, E atd. Výrobci ocelí u ocelí garantují většinou pouze obsahy hlavních složek jako C, Mn, Si, P a S. [10]

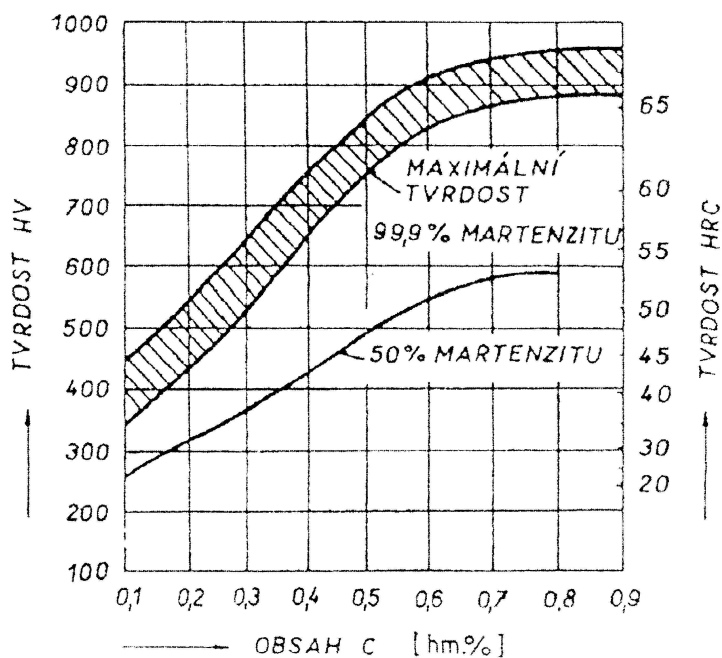
Svařitelnost uhlíkových ocelí je nejvíce ovlivňována obsahem uhlíku. Se zvyšujícím se množstvím uhlíku dochází k zvyšování meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti, zároveň dochází i ke snižování plastických vlastností, což je mnohdy velmi nežádoucí. Vysokým obsahem uhlíku dochází i k náchylnosti k zakalení svarového kovu při svařování. Dále má vysoký obsah uhlíku vliv na vznik studených trhlin, a to hlavně v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). [1]

3.2 Vliv chemického složení ocelí na jejich mechanické vlastnosti a svařitelnost dle jednotlivých prvků

Všechny prvky, které jsou v ocelích obsaženy ovlivňují svým způsobem svařitelnost. Ať už více či méně. K nejvýznamněji sledovaným prvkům řadíme uhlík. Právě uhlík je prvkem nejvíce ovlivňujícím svařitelnost uhlíkových ocelí. Další důležité prvky, kterými je potřeba se při řešení otázky svařitelnosti zabývat jsou např. síra, fosfor, měď, nikl, chrom atd. Dále se jedná o plyny. Plyny výrazně ovlivňující svařitelnost ocelí jsou kyslík, dusík a vodík. Účinnost těchto jednotlivých prvků je vyjádřena jejich poměrným účinkem, který se nazývá uhlíkovým ekvivalentem C_E , a je popsán v následující kapitole.

3.2.1 Uhlík a jeho vliv na tvrdost svarového spoje

Tvrdost svarového spoje je významnou vlastností, ovlivňuje ji obsah martenzitu ve strukturách TOO. Je tedy závislá na obsahu uhlíku. Obsah uhlíku mění především mechanické vlastnosti ocelí. S rostoucím obsahem uhlíku rostou hodnoty R_m , R_e , a HV oceli a snižují se její plastické vlastnosti vyjádřené hodnotami KCV, A_5 a Z. Podrobným zkoumáním byla stanovena kritéria, jež udávají maximální tvrdost v TOO, kdy ještě nedochází k porušení vlivem praskání. Právě trhliny jsou totiž nepřípustné ve všech systémech hodnocení svarového spoje. Nejvyšší hodnota tvrdosti ve svarovém spoji tepelně nezpracovaných uhlíkových ocelí je stanovena na 350 HV. Podle následujícího obr. 3.1 dosáhneme tvrdosti 350 HV u tepelně nezpracovaných ocelí při 0,25% uhlíku a 50% obsahu martenzitu ve svarovém kovu.



Obr. 3.1. Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO [1]

Uhlíkový ekvivalent

Vliv chemického složení oceli na její svařitelnost vyjadřujeme nejčastěji tzv. ekvivalentem uhlíku C_E , který vyjadřuje příspěvek jednotlivých legujících prvků ke kalitelnosti oceli. Čím se daná ocel snadněji zakalí, to znamená, že roste nebezpečí vzniku křehkých zakalených struktur v TOO svarového spoje a ve svarovém kovu i při nižších rychlostech ochlazování, tím obtížněji se daná ocel svařuje. Proto je C_E zároveň ukazatelem svařitelnosti oceli z hlediska jejího chemického složení. Dominantní úlohu v tomto určení hraje ve všech používaných formulacích C_E obsah uhlíku v oceli. Vtahů je několik a jsou rozdílné svým vyjádřením. V některých se bere v potaz i tloušťka svařovaného materiálu. [10]

Čím je hodnota uhlíkového ekvivalentu vyšší, tím hůře se daný materiál bude svařovat. Pokud je hodnota $C_E \leq 0,45$ hm. % a zároveň platí, že $C \leq 0,20$ hm. % a svařovaná tloušťka $s \leq 25$ mm, je nutné užití zvláštních opatření proti vzniku trhlin. Opatření proti vzniku trhlin zahrnují zejména použití předeřevu.

Příklady výpočtu uhlíkového ekvivalentu jsou uvedeny v následujících rovnicích. Rovnice 3.1 uvádí výpočet dle ČSN 05 1310, rovnice 3.2 dle IIW a rovnice 3.3 dle autorů Ito a Bessyo.

Rovnice 3.1 je dle ČSN 05 1310 vhodná pro výpočet uhlíkového ekvivalentu u materiálů s maximálním obsahem $C=0,22$ hm. %, $Mn=1,6$ hm. %, $Cr=1$ hm. %, $Ni=3,0$ hm. %, $V=0,14$ hm. %, a $Cu=0,30$ hm. %. Hodnota s je tloušťka materiálu. [1]

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [\text{hm. \%}] \quad (3.1)$$

Rovnice 3.2 uvádí výpočet uhlíkového ekvivalentu dle IIW. Je vhodná pro materiály s obsahem $C < 0,25$ hm. %. [1]

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\text{hm. \%}] \quad (3.2)$$

Rovnice 3.3 uvádí výpočet uhlíkového ekvivalentu dle dvojice japonských autorů Ito a Bessyo. Je vhodná pro materiály s obsahem C < 0,16 hm. %. [1]

$$C_E = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad [\text{hm. \%}] \quad (3.3)$$

3.2.2 Další prvky výrazně ovlivňující svařitelnost

Křemík

V nelegovaných uhlíkových ocelích zvyšuje pevnost feritu. Působí silně desoxidačně. Nedostatek křemíku vede k tomu, že ocel je neuklidněná, tedy nemá vyrovnané složení. Neuklidněná ocel vzniká při obsahu Si pod hranicí 0,1 hmotnostního procenta. Horní hranice obsahu Si je stanovena na 0,45 hmotnostního procenta.

Mangan

Zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti bez vlivu na sníženou hodnotu plasticity. Použitím vyššího obsahu manganu je možné dosáhnout ve svařitelných uhlíkových ocelích vyšších hodnot meze kluzu a meze pevnosti. Nelegované uhlíkové oceli obsahují 0,30 až 1,7 hmotnostního procenta manganu. Mangan působí stejně jako Si desoxidačně a společně se používají pro výrobu uklidněných ocelí. Uklidněné oceli vznikají úplným odkysličením ještě v peci před odléváním a mají vyrovnané složení. Protože mangan se váže se sírou a vytváří MnS (sulfid manganatý), je používán i na snížení obsahu síry v oceli.

Fosfor

Fosfor zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti a zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi především ve spojení s mědí. Jeho přítomnost snižuje plasticitu oceli a způsobuje zkřehnutí za studena. V současnosti se u nelegovaných ocelí omezuje obsah fosforu na max. 0,04 hmotnostního procenta. [10]

Fosfor zvyšuje sklon k segregaci, což je proces vzniku nerovnoměrného chemického složení ve výsledné struktuře při nerovnoměrném tuhnutí, a to tak, že prodlužuje dvoufázovou oblast v rozmezí teplot 1534 až 1050 °C. Způsobuje popouštěcí křehkost, snižuje vrubovou houževnatost, zvyšuje sklon k lámavosti za studena a zhoršuje svařitelnost. [1]

Síra

Síra se dostává do ocelí z rud a paliva. Má příznivý vliv na obrobitelnost, a proto se úmyslně přidává do nelegovaných konstrukčních ocelí za účelem zlepšení obrobitelnosti. Železo a sulfid železnatý vytváří nízkotavitelné eutektikum, jehož bod tavení se vlivem oxidu železnatého posouvá k nízkým teplotám. Kritická je široká oblast tuhnutí od bodu tavení železa při 1534 °C až k bodu tavení Fe-FeS eutektika při 988 °C. V rozsahu teplot 1534 °C až 988 °C je tuhý roztok γ v rovnováze s tekutou fází, která může dosáhnout eutektické koncentrace kolem primárních zrn, a to až 31 hmotnostních procent síry. Proto při tváření za tepla a svařování dochází k natavení eutektika na hranicích zrn a tím nastane porušení materiálu. [10]

Toto je nazýváno náchylností na vznik teplých likvančních trhlin. U nelegovaných ocelí je povolen max. obsah síry 0,04 hmotnostního procenta. Vysoký obsah síry je jednou z hlavních příčin vzniku lamelárních trhlin, které vznikají především za vysokých teplot jak v základním materiálu, tak v TOO, když je zóna při svařování namáhána ve směru tloušťky plechu. To se děje např. u koutových svarů. [10]

Dusík

Dostává se do oceli z pecní atmosféry. Obsah dusíku v oceli se může dostat až na 0,04 hmotnostního procenta. To se děje při teplotě 1600°C. Dusík je austenitotvorný prvek a proto jeho přítomnost v uhlíkové oceli způsobuje rozšíření pole γ . Vznik nitridů má podstatný vliv na vlastnosti ocelí, neboť se zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost. Současně však dochází ke snížení plastických vlastností, a to zejména tažnosti, vrubové houževnatosti a meze únavy. [10] V nelegovaných a nízkolegovaných ocelích zvyšuje dusík výskyt mezikrystalické koroze pod napětím. Vylučováním nitridů železa způsobuje stárnutí uhlíkových ocelí v úzkém okolí svaru. Tím dochází k zvýšení pevnosti a tvrdosti na úkor snížení plastických vlastností a houževnatosti. U zařízení pracujících za vyšších teplot dochází ke zvýšení křehkosti v TOO.

Vodík

Do ocelí se dostává při výrobě, nebo pohlcením při svařování, a je nežádoucí příměsí. Největší rozpustnost vodíku je v železe γ , která je větší než v ostatních fázích. Mez rozpustnosti vodíku při teplotě 1530°C je 28 cm³ ve 100 g železa. Vodík se v kovu

bud' zcela rozpustí, nebo vytváří s kovy hydridy. Hlavními problémy, jež vodík způsobuje, jsou:

- Vodíková koroze
- Pórovitost svarového kovu
- Oduhličení svarového kovu
- Vznik trhlin ve svarovém kovu a TOO
- Vznik tzv. rybích ok

Při tavném svařování se vodík dostává do svaru skrze vlhkost obalu elektrody a tavidla, z vlhkosti na povrchu základního materiálu a přídavného materiálu, ze zbytků maziv ulpěných a povrchu například při tažení přídavného materiálu – drátu, vč. drátu pro jádra elektrod. Dále to může být vodík absorbovaný při moření i poměďování povrchů drátů, zbytky po povrchových úpravách přídavných i základních materiálů, korozních produktů, barev a mazadel na svarových plochách. [10]

Hliník

Má sklon vytvářet nitridy s N a snižuje náchylnost ke stárnutí. Při legování zvyšuje odolnost proti oxidaci a je významnou součástí korozivzdorných ocelí s velkým odporem, které se dále používají na topné články, či odporníky. Dále působí silně deoxidačně a denitrifikačně. Oxidy a nitridy hliníku působí jako krystalizační zárodky při tuhnutí oceli. Pro silně uklidněné oceli je minimální předepsaný obsah uhlíku určen hodnotou 0,02 hmotnostního procenta.

Měď

Do nelegovaných ocelí se dostává používáním šrotu s obsahem mědi. Obsah mědi do 0,26 hmotnostního procenta se pokládá za neškodný. Měď zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi při obsahu 0,15 až 0,50 hmotnostního procenta. Při tomto poměru vytváří těsnou nepropustnou lidickou vrstvu, která chrání výrobek před další atmosférickou korozi. Toto se využívá u konstrukčních ocelí odolných proti atmosférické korozi, které se nazývají Corten a Atmosfix. [10] Při vyšším obsahu však může způsobovat povrchové trhliny. Měď zlepšuje prokalitelnost. Má však špatný vliv na houževnatost a svařitelnost.

Nikl

Nikl se přidává do ocelí a svarových kovů za účelem zlepšení jejich vlastností jako jsou:

- Mez kluzu
- Vrubová houževnatost
- V kombinaci s Cr zvýšená prokalitelnost
- Plasticita

Chrom

Výrazně zpevňuje svarový kov. Při dolegování Cr je nutné zvýšení teploty předehřevu, abychom zabránili vzniku studených trhlin ve svarovém spoji. Přidáním chromu dosáhneme:

- Vyšší prokalitelnosti
- Vyšší pevnosti
- Větší otěruvzdornosti
- Zvýšíme pevnost za tepla
- Zlepšení odolnosti proti korozi

Molybden

Při rozpuštění molybdenu v tuhém roztoku dosáhneme substitučního zpevnění materiálu.

- Molybden je karbidotvorný prvek, který:
- Zvyšuje prokalitelnost (zvláště v kombinaci s Cr)
- Snižuje vývin popouštěcí křehkosti
- Zvyšuje žárupevnost a pevnost za tepla
- Zlepšuje odolnost proti korozi a chemickým vlivům
- Zlepšuje svařitelnost

Vanad

Vanad s dusíkem vytváří karbonitridy, které zvyšují pevnostní vlastnosti ocelí a svarových kovů při vysokých teplotách a v oblasti tečení. Způsobuje:

- Zlepšení únavových vlastností
- Snížení náchylnosti ke stárnutí ocelí
- Zvyšuje odolnost proti opotřebení
- Zlepšuje odolnost proti popouštění a přehřátí
- Zvýšení meze pevnosti (použití např. u pružin)
- Zlepšení svařitelnosti

Arsen

Zvyšuje popouštěcí křehkost a zhoršuje svařitelnost. Dá se odstranit žíháním.

3.3 Předehřev svarového spoje

Obsah uhlíku ve svařitelných ocelích by měl mít hodnotu $C < 0,25 \text{ hm. \%}$. Při tomto obsahu uhlíku nemusíme většinou svarové spoje uhlíkových ocelí menších tloušťek předehřívat. Materiály International Institute of Welding (IIW) například doporučují nepředehřívat svarové spoje uhlíkových ocelí s mezí pevnosti do 700 MPa, pokud jsou splněna kritéria dle následujících tabulek.

Při uvažování teploty předehřevu oblasti svaru je nutné brát v úvahu i průměr elektrody a použitou svařovací metodu. Při větším průměru elektrody potřebujeme větší svařovací proud a samozřejmě tedy dochází i k většímu tepelnému příkonu.

V případech nutnosti svařování uhlíkových ocelí s vyšším obsahem uhlíku, nebo větší tloušťky svaru předehříváme vždy. Tabulka 3.1 uvádí doporučené teploty předehřevu pro oceli s obsahem C vyšším, než 0,25 hm. %.

Tab. 3.1 Teplota předehřevu pro oceli s obsahem C vyšším než 0,25 hm % [1]

Obsah uhlíku [hm. %]	Teplota předehřevu [°C]
0,2 až 0,3	100 až 150
0,3 až 0,45	150 až 275
0,45 až 0,8	275 až 425

Výši teploty předehřevu potřebnou pro zamezení vzniku studených trhlin ovlivňují kromě obsahu uhlíku i další parametry jako chemické složení oceli, obsah difuzního vodíku, tepelný příkon či tuhost konstrukce. Proto je spolehlivější se o nutnosti použití předehřevu přesvědčit výpočty dle metod uvedených v ČSN EN 1011-2. [8]

3.4 Dohřev svarového spoje

Dohřev svarových spojů se používá především u svarů velkých tloušťek, či u materiálů s vysokým obsahem difuzního vodíku. Co se týče uhlíkových ocelí, teplota interpass, tedy mezihousenková teplota se většinou nepředepisuje. [10]

U ocelí s vyšším obsahem uhlíku se doporučuje dohřev na teplotě vyšší než 200°C, a to po dobu 2 až 6 hodin z důvodu snížení obsahu nežádoucího vodíku ve svaru. Dohřev je v tomto případě důležitý pro difundaci vodíku ven ze svaru. Svařence větších tloušťek dále tepelně zpracováváme žíháním na snížení zbytkových napětí. [1] Žíhání se provádí při teplotách 550 až 650°C.

Přesné mezní tloušťky svaru proveditelného bez předehřevu v závislosti na obsahu difuzního vodíku ve svarovém kovu, tepelném příkonu a také uhlíkovém ekvivalentu C_E jsou dány normou ČSN EN 1011-2, viz tab. 3.2.

Tab. 3.2 Maximální kombinovatelná tloušťka svařovaná bez předehřevu [8]

Obsah dif. vodíku ^a (ml/100g svar. kovu)	Maximální kombinovaná tloušťka (mm)			
	CE = 0,49		CE = 0,43	
	Tepelný příkon		Tepelný příkon	
	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm
> 15	25	50	40	80
10 ≤ 15	30	55	50	90
5 ≤ 10	35	65	60	100
3 ≤ 5	50	100	100	100
≤ 3	60	100	100	100

^a Měřeno podle ISO 3690

3.5 Svařování uhlíkových ocelí metodou 135

Metoda 135 je v teoretické části popsána z důvodu jejího použití v praktické části.

Jedná se o obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu. Svařování metodou 135 popisuje obr. 3.5.



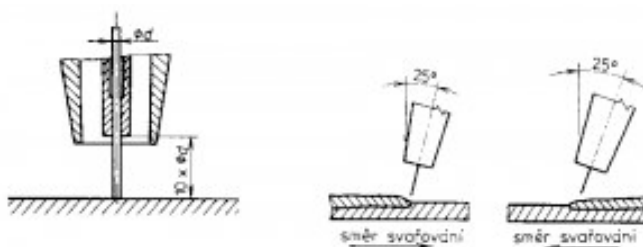
Obr. 3.5 Svařování metodou 135 (MAG) [15]

Metoda je vhodná pro svařování uhlíkových ocelí, nerezových ocelí, hliníku a jeho slitin, či speciálních kovů jako jsou Ni, Cu a jejich slitiny. V současné době nejvíce rozšířenou metodou svařování. Využívají ji jak hobby svářeči, tak i profesionální firmy. Mezi hobby svářeče a kutily se dostala především z důvodu jednoduchosti. Odpadá skladování elektrod, v případě krátkého svařování není znehodnocena elektroda, ale využije se pouze ta délka, která je v dané situaci potřebná. Metoda je také úsporná, co se týče využitelnosti přídatného materiálu. Zatímco u ručního svařování obalovanou elektrodou se stane z každého kilogramu prodané elektrody součástí svarového spoje jen

asi 65% materiálu, při použití svařovacího či trubičkového drátu se dostáváme na hodnotu v rozmezí 80 – 90 %. Oproti obalované elektrodě však musíme počítat s potřebou přídavných plynů. V dnešní době došlo k poklesu cen svářeček pro metodu 135 (svařovacích CO_2) a tak se stáváme svědky toho, že si je může dovolit o mnoho více uživatelů, než tomu bylo v minulosti.

3.5.1 Princip metody

Při svařování metodou 135 je potřebný žár vytvářen elektrickým obloukem, který je udržován mezi svařovaným materiálem a přídavným materiálem – drátem. Schéma vzdálenosti konce průvlaku od základního materiálu a vedení svařovací hubice je znázorněno v obr. 3.6. Do místa svaru je neustále dodáván přídavný svařovací materiál speciálním hořákem, kterým zároveň přivádíme i ochranný aktivní plyn, nebo směs plynů. Úkolem tohoto plynu je ochrana tavné lázně, stabilizace elektrického oblouku a ochrana plochy kolem svaru před ostatní atmosférou a jejími možnými nežádoucími vlivy.



Obr. 3.6 Schematické znázornění vzdálenosti konce průvlaku a polohy hubice

Pokud použijeme plyn CO_2 , je při této metodě konec průvlaku přibližně v desetinásobné výšce nad svařovaným materiálem, jako je průměr použitého drátu. Ve směsném plynu či při svařování trubičkou s vlastní ochranou bez plynu se tato vzdálenost nepatrně liší. Hořák je odkloněn od kolmice v úhlu 25° a je možno svařovat oběma směry. Při svařování zleva doprava však dochází k převýšení svaru, svar je poté široký a nedosáhne dostatečného průvaru. Toto je možno použít pro tenké součásti. U svařování zprava doleva je svar plochý, užší a dosahuje se většího průvaru.

3.5.2 Volba ochranné atmosféry a její funkce

Hlavní úloha ochranných plynů používaných při svařování je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování. Tedy chránit elektrodu, oblouk, tavnou lázeň, její okolí a také kořen svaru před nežádoucími účinky kyslíku obsaženého ve vzduchu.

Pokud se vzdušný kyslík dostane do místa svaru, způsobuje oxidaci, vytváří póry ve svarovém kovu a také dochází k propalům. Použití svařování s ochranným plynem se hodí pro většinu materiálů a přídavné materiály jsou k dispozici pro široký sortiment kovů. Ochranné plyny mají také velký význam pro přenos kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, na chování tavné lázně, hloubku závaru, rychlost svařování a pro řadu dalších parametrů svařování.

Správně zvolený ochranný plyn umožní svým složením ovlivnění:

- Dobrého startu a hoření oblouku vytvořením ionizovaného prostředí
- Tvaru a rozměrů průřezu svaru
- Charakteru přenosu kovu v oblouku, mění tvary a rozměry kapek a také rychlost jejich přenášení uvnitř oblouku
- Kvalitu svarového spoje, jeho celistvost a mechanické vlastnosti
- Metalurgických dějů v době utváření kapek, dějů ve svarové lázni
- Hladkosti povrchu svaru a jeho přechod v základní materiály

V současné době se používají jak jednosložkové, tak více složkové plyny. Dle jejich charakteru se projevují neutrálním, oxidačním, či nauhličujícím vlivem na svarovou lázeň. Je možno použít čistého oxidu uhličitého CO_2 , označovaného C1 dle ČSN EN ISO 14175. To je však nejlevnější varianta, která se používá při svařování v ochranných atmosférách. Čistý oxid uhličitý s sebou přináší potřebu přesnějšího nastavení svařovacích parametrů, menší pravidelnost svarové housenky a její větší převýšení a rozstřík v okolí svaru. Projevuje se také ostřejším přechodem svaru a svarového materiálu.

V současné době je nejčastěji používaná směs plynů pod označením M21 dle ČSN EN ISO 14175. Je nákladnější než čistý oxid uhličitý, avšak poskytuje klidnější a měkčí housenky a nižší rozstřík svarového kovu. Zároveň dochází ke zvyšování hodnot vrubové houževnatosti svarového kovu. [15]

3.6 Příčiny vzniku vad ve svarových spojích

Trhliny se dělí dle okamžiku vzniku na trhliny a tepla, trhliny za studena, žíhací, či lamelární trhliny. Trhliny za tepla vznikají při tuhnutí a ochlazování tavné lázně při teplotách 1280-800°C a závisí především na metalurgické čistotě materiálů. [17] Horké trhliny vznikají převážně za vysokého obsahu uhlíku, manganu a dalších legur, nebo při vysokém obsahu síry. Studené trhliny se projevují po ukončení svařování a to za teplot pod 300-200°C. Vznikají při transformaci austenitu na rozpadové struktury při společném působení difuzního vodíku a tahových napětí v daném svaru. Mohou se tvořit i u ocelí s vyšším obsahem uhlíku, nebo v legovaných ocelích. Lamelární trhliny se tvoří jak v základním materiálu, tak v místech TOO. Vznikají především za vysokých teplot, ale šířit se mohou i za studena. K většímu výskytu dochází, pokud je TOO ovlivněna namáháním ve směru tloušťky svařovaného plechu (příkladem jsou koutové svary). Mívají kaskádovitý, stupňovitý tvar, zpravidla je tento tvar rovnoběžný s povrchem plechu. Ovlivnit se dají změnou konstrukce svařovaného uzlu, či změnou způsobu svařování a záměnou svařovacích parametrů. Dále se ovlivňují úpravou a kontrolou žíhacích programů. Pro snížení náchylnosti na vznik žíhacích trhlín za nízkých teplot je možné snížit rychlost ohřevu v teplotní oblasti do přibližně 400°. To především v prvních stádiích do 250°C a pak rychlost ohřevu zvýšit. Stejně postupy platí i pro rychlosti ochlazení z žíhacích teplot. Rychlost ochlazování se u materiálů náchylných na vznik žíhacích teplot pohybuje v rozmezí 30 až 80°C za hodinu. Tyto parametry jsou udány normou ČSN 050211.

Žíhací trhliny vznikají při žíhání svarů. Mohou se vyskytovat také u vícevrstvých svarů. Tvoří se v nízkoteplotních oblastech pod 300°C vlivem velkého teplotního gradientu mezi povrchovou a střední linií spoje. Mohou vznikat i v oblastech dolních žíhacích teplot v rozmezí 500-600°C, a to především u ocelí chromových a vanadových.

Objemové vady, tedy dutiny, póry a bubliny jsou buď kulovitého, nebo protáhlého tvaru vyplněné plynem. Mohou být také plošného charakteru v podobě trhlín. Vznikají při nedostatečné ochraně tavné lázně před vlhkostí ve vzduchu, při nedostatečně očištěných svarových plochách, či použitím nevysušených bazických elektrod apod.

Studené spoje jsou vyvolány nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Vyvolávají je především nedostatečné svařovací proudy, nesprávné vedení elektrody, či velká rychlost svařování případně nevhodně volený průměr elektrody. Neprůvary, nejčastěji neprovařený kořen vznikají v důsledku neúplného natavení základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Nejčastěji se objevují při svařování metodami MIG/MAG a to při zkratovém procesu. Hlavními příčinami se označují špatné sestavení před svařováním s malou mezerou

v koření, nízká hodnota svařovacího proudu, či svařování velkou rychlostí, kterým dojde k předběhnutí svarové lázně.

Tvarové a rozměrové vady jako zápalý na okrajích povrchu jsou ostré natavené prohlubně na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Příčinou vzniku je vytavení základního materiálu a nevyplnění vzniklého vrubu svarovým kovem. Nejčastěji se objevují u svarů koutových, a příčinami vzniku bývá použití vysokého svařovacího proudu, dlouhého oblouku, nevhodného průměru elektrody, nebo nesprávné vedení elektrody.

Vady jako převýšení svaru vznikají nedostatečnou zručností svářeče a můžeme je odstranit broušením. Přetečení kořenové nebo krycí vrstvy vniká při svařování vodorovného svaru na svislé stěně za současného použití elektrody velkého průměru a nedostatečné zručnosti svářeče. Stejně tak zručnost svářeče ovlivňuje i vady typu špatného napojení, nesprávných konečných rozměrů, nedostatečné tloušťky svaru či nadměrné výšky svaru. Z velké části jsou tyto nedostatky opravitelné.

3.7 Zkoušky svarových spojů

Každý svarový spoj musí odpovídat určitým požadavkům daným typem konstrukce či způsobem provozu. Když se však začneme blíže zabývat makro a mikro strukturami kovových materiálů zjistíme, že žádný materiál nejde zhotovit běžnými technickými postupy bez vad. Toho se dá případně docílit pouze ve zvláštních podmínkách v laboratořích. V každém kovovém materiálu je již od výroby veliké množství submikroskopických vad (na úrovni krystalových mřížek, atomů a zrn), které zcela zásadně ovlivňují vlastnosti každého kovového materiálu. Takovéto vady obsahují všechny technicky vyrobené materiály. [15]

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami, případně smluvním vzorkem. Vady výrobků mohou být zjistitelné pouhým pohledem či jednoduchými pomůckami, ty se označují za zjevné. Mohou být i skryté, které se zjišťují přístroji, nebo laboratorními zkouškami. Zjištěné vady a dále dělí na vady přípustné, které jsou v toleranci předem daných norem či smluvních podmínek, a na vady nepřípustné. Vady nepřípustné se dělí na vady opravitelné a neopravitelné.

Co se týče svařování, tak se tyto vady dělí na plošné a objemové. Plošné vady zahrnují trhliny, neprůvary, či studené spoje. Objemové se projevují často pod povrchem

v podobě bublin, kovových a nekovových vměstků, zápalů, vrubů, pórů. Řadí se zde i nepravidelnost povrchu svarů či nedodržení předepsaných rozměrů svaru.

Z důvodu různorodého použití svarů ve strojírenství a různorodých možností namáhání svarových spojů existuje celá řada zkoušek svarových spojů. Provádí se zkoušky nedestruktivní, po jejichž provedení se dají výrobky bez problémů používat. Ty vycházejí z předpokladu, že pokud ve svarovém spoji nejsou viditelné vady, nebo jsou jen malé, bude spoj dobře sloužit v provozu. Tvrzení je však nepříliš vhodné, protože spoustu nedostatků nemusíme takto odhalit. V praxi však nemáme příliš možností ověřovat prokazatelně všechny potřebné hodnoty. Je celá řada vlastností, které se dají zjistit pouze destruktivními zkouškami. Tedy těmi, po kterých už není možno daný prvek uvést do provozu, a jsou likvidační. Proto se provádějí na zvláštních kusech vyrobených pouze k těmto účelům. Při hodnocení těchto zkoušek vycházíme z předpokladu, že pokud všechny vzorky budou vyhovovat předepsaným mezním hodnotám daných zkoušek, pak bude tato technologie výroby vhodná a je možno ji dále používat.

Z důvodu, že problematika zkoušení svarových spojů je velmi obsáhlá, budou dále popsány jen zkoušky navržené pro zadaný svarový spoj oceli S355J2+N s ocelí G30CrMoV6-4.

Nedestruktivní zkoušky:

Zkouška vizuální:

Jedná se o nejdostupnější, nejlevnější a nejběžnější metodu zjišťování vad ve svarových spojkách. Je určena normou ČSN EN 970 a provádí se prohlídkou prostým zrakem, nebo při potřebě vyšší jakosti pomocí zraku a optických přístrojů. Používají se lupy, které umožňují odhalit i menší povrchové defekty. Zároveň se tak ověřují podmínky pro další nedestruktivní kontroly. Pro provádění těchto zkoušek má velký význam zkušenost pracovníka. Nemusí být získávána letitou praxí, pracovník ji může získat přeškolením. Musí však být v obou případech držitelem příslušného certifikátu. Zkouška se vyhodnocuje dle ČSN EN ISO 5817. Seznam přípustných a nepřípustných vad je uveden v ČSN EN ISO 6520-1.

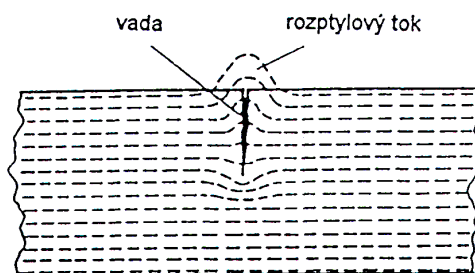
Zkouška magnetická prášková:

Tato metoda slouží ke zjišťování povrchových necelistvostí. Provádí se dle ČSN EN ISO 17638 a vyhodnocení udává norma ČSN EN ISO 23278. Zkouška nám umožňuje indikovat necelistvosti, ležící těsně pod povrchem, tedy s povrchem přímo spojené. Neklade takové nároky na přípravu zkoušeného povrchu a jeho čistotu, necelistvosti mohou být vyplněny nemagnetickým materiálem. [10]

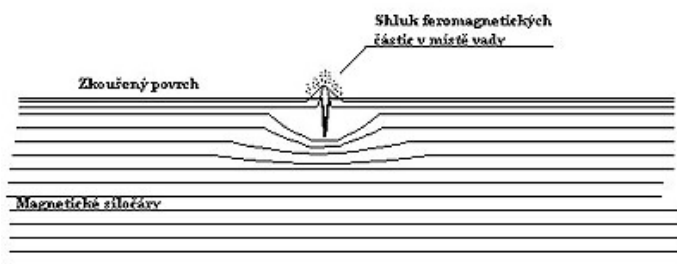
Základní princip metody spočívá ve zmagnetizování materiálu. Z toho vyplývá, že je vhodná pro materiály feromagnetické. Používá se převážně pro oceli obvyklých konstrukčních jakostí. Není vhodná pro paramagnetické materiály. Mezi ty se řadí vysokolegované oceli a materiály s prvky hliníku, mědi apod. Je-li zkoušený kov zmagnetizován, prochází jím magnetický tok. Trhlina, která se nachází někde v průřezu zkoušeného prvku bude objektem s podstatně vyšší magnetickým odporem než základní materiál. Jelikož celková velikost magnetického toku zůstává konstantní, dochází ke změně směru siločar. Pod necelistvostí pak dojde k jejich zhuštění, část siločar vystupuje v okolí vady nad povrch součásti. Právě tyto vystupující siločáry vytvářejí rozptylový tok vady a v místě, kde vycházejí z povrchu vytvářejí magnetické póly.

Po nanesení jemného feromagnetického prášku na zmagnetizovaný předmět je tento prášek zachycen působením rozptylového toku v oblasti vzniklých magnetických pólů a vykreslí tvar vady. Vada se výrazně zviditelní, neboť v místech mimo vadu se prášek nezachytí. Šířka rozptylového toku je totiž mnohem větší, než šířka zvýrazněné necelistvosti.

Faktory ovlivňující velikost rozptylového toku jsou například velikost magnetické indukce, orientace vady vůči magnetickému toku, hloubka vady pod povrchem, tvar vady či hloubka a šířka vady. Rozptylový tok je znázorněn na obr. 3.7. Vytvoří se pouze tehdy, je-li tok magnetického pole přibližně kolmý na vadu. Pokud je vada rovnoběžná se směrem magnetického toku, rozptylový tok se nevytvoří. Z tohoto důvodu se používá více způsobů magnetizace jako například pólová či cirkulární. Dalším hlediskem, jež ovlivňuje velikost rozptylového toku je samozřejmě hloubka vady pod povrchem. Nejvýraznější rozptylový tok vzniká, pokud se vada nachází těsně pod povrchem. Tam se nám utvoří shluk feromagnetických částic, viz. obr. 3.8, které vyznačí místo vady. U vad hluboko pod povrchem už rozptylový tok téměř zaniká.



Obr. 3.7 Vzniklý rozptylový tok [10]



Obr. 3.8 Shluk feromagnetických částic vyznačujících místo vady [17]

Zkouška ultrazvukem:

Zkouška ultrazvukem je dána normou ČSN EN 17 a vyhodnocuje se dle ČSN EN 1712. Je založena na šíření akustického vlnění zkoušeným materiálem. Po průchodu těchto vln zkoušeným předmětem se zachycují změny, které jsou vyvolány ve zkoušeném prostředí interakcí na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými akustickými vlastnostmi. To je dáno například bublinami, trhlinami či vměstky. Tedy nehomogenitou prostředí.

Destruktivní zkoušky:

Zkouška makrostruktury:

Zkouška makrostruktury patří mezi zkoušky metalografické. Metalografické zkoušky doplňují údaje získané zkouškami mechanických vlastností. Jejich úkolem je ověřit stav struktury materiálu, tedy v našem případě svarových spojů. Dělí se dle použitého zvětšení na zkoušky makrostruktury a zkoušky mikrostruktury. Mikrostruktura

se ověřuje pomocí optického či elektronového mikroskopu, jelikož se pracuje s většími zvětšeními. U makrostruktury sledujeme povrch pouhým okem, nebo se případně používají lupy. Velice důležitou částí metalografických zkoušek je dokonalá příprava zkušebních vzorků. Příprava spočívá v mechanickém oddělení, které zároveň nesmí nijak ovlivnit strukturu materiálu, poté opracování a postupným vytvářením povrchu, který je vhodný pro tato studování. Dokonale opracovaného povrchu se většinou docílí broušením na metalografických papírech, u kterých postupně snižujeme hrubost zrn. Poté se povrch leští elektronicky či mechanicky. U tohoto se používají buď elektrolytické postupy, nebo pasty například s diamantovým prachem.

U zkoušky makrostruktury používáme pro získání požadovaného povrchu činidla, která vyvolají zvýraznění makrostruktury. Nejčastěji se používají leptadla. Jsou to vodní roztoky kyseliny dusičné, nebo persíranu amonného. Výsledné povrchy se většinou fotografují pro možnost uchování a případnou reprodukci.

Zkouška tvrdosti svarového spoje:

Zkoušky tvrdosti svarových spojů se provádějí podle normy ČSN EN 1043-1. Měří se tvrdost dle Vickerse, to znamená, že vnikajícím tělískem je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Zkušební zatížení je 49 a 98 N – HV 5, HV 10. Teplota okolního prostředí je stanovena na $23 \pm 5^\circ\text{C}$. [10].

Princip zkoušky spočívá v odběru zkušebních vzorků ze svaru pomocí mechanického řezání. Povrch vzorků však nesmí být ovlivněn, proto musí být zvolena správná technologie dělení. Samotné řezy jsou provedeny kolmo na osu svarového spoje a vzorek musí sestávat ze základního materiálu neovlivněného svařováním, obou TOO a svarového kovu. Po odebrání se povrch vzorku upraví broušením či v případě potřeby leptáním, po kterém dojde k zviditelnění jednotlivých oblastí svarového spoje. Pro tyto zkoušky se často používají vzorky, které byly před tím připraveny pro zkoušky makrostruktury. Rozmístění vtisků na vzorku a jejich počet musí být volen tak, abychom byli schopni určit oblasti s různými úrovněmi tvrdosti. Tyto oblasti vznikají právě dodávaným teplem při svařování. Vzdálenosti vtisků jsou dány normami stejně jako doporučená místa pro měření tvrdosti. Po změření potřebných hodnot a jejich zaznamenání do příslušných formulářů se vykreslí příslušné hodnoty do grafu. Mezní hodnoty se poté srovnávají s hodnotami určenými příslušnými normami, zda vyhovují. Poté se zapisují změřené údaje do zprávy o zkoušení. Obsah a minimální počet hodnot v nich udaných je předepsán normou ČSN EN 1043-1. [10]

Zkouška rázem v ohybu:

Zkoušky rázem v ohybu se u svarových spojů provádějí podle normy

ČSN ISO 148. Doplnující je norma ČSN EN 875, která popisuje umístění zkušebních tyčí ve svarovém spoji a způsob jejich označování. Dále uvádí požadavky, které musejí být uvedeny v protokolu o vykonání zkoušky. Pro snadnější umístění vrubu ve svarovém spoji může být použito naleptání řezu svarového spoje na jeho makrostrukturu.

Podstatou této zkoušky je přeražení zkušební tyče, která je na jedné straně opatřena vrubem. Provádí se pomocí nárazového kyvadlového kladiva (Charpyho). Zkouška končí destrukcí zkušebního vzorku a poté se vyhodnocují údaje jako např. nárazová práce. Hodnoty nárazové práce, či vrubové houževnatosti musí odpovídat požadavkům výrobních norem, průřezových norem, nebo jiných technických předpisů, které byly stanoveny mezi odběratelem a zákazníkem.

Zkouška tahem:

Zkouška tahem slouží u svarových spojů k testování tupých svarových spojů. Zjišťuje se tak u nich mez pevnosti v tahu a poloha lomu. Zkušební tyče jsou odebírány kolmo na osu svarového kovu. Pokud chceme stanovit vlastnosti přímo svarového kovu, pak se odebírají zkušební tyče pouze ze svarového kovu ve směru osy svaru. Vzorky se přitom odebírají tak, aby osa svarového spoje zůstala osou vzorku. Metoda použitá pro oddělování vzorku nesmí za žádných okolností ovlivnit jeho vlastnosti. Při oddělování zkušebních tyčí musí být dodrženy požadavky na drsnost povrchu dle EN 10002-1. Každá tyč odebraná ze svarového spoje musí být pečlivě označena a zaznamenána, aby bylo možné určit její přesnou polohu a ve svarovém spoji. Materiál u tohoto vzorku nesmí být smísen se základním materiálem, který byl svařován. Zkušební tyče se odebírají ze spojů, které nebyly předtím tepelně zpracovávány. Pokud tak bylo, musí být každé tepelné zpracování uvedeno ve zkušebním protokolu.

Odebírání vzorků ze svarového spoje stanovuje norma ČSN EN 895. Zkoušky se provádí dle ČSN EN ISO 6892-1, ČSN EN 895. Výsledky zkoušky se vyhodnocují dle ČSN EN 10002-1. Pro lepší určení polohy lomu je možné zkušební tyč naleptat. Po přetržení zkušební tyče se musí lomová plocha vyhodnotit a všechny vady, které mohou nepříznivě ovlivnit výsledky zkoušky musí být zaznamenány do protokolu o zkoušce. [10]

Zkouška lámavosti:

Používá se jak pro svarové, tak pájené spoje. Zkušební tyč se uloží na dvě podpory, vytvoříme tedy nosník na dvou podporách. Z hodnoty průhybu se určí deformační vlastnosti. Například normálové napětí rozložené v průřezu, pevnost v ohybu, či zda se začnou při určitém průhybu projevovat trhliny v materiálu. Nejčastěji se používá ohyb o 180° dle ČSN EN ISO 5173. Po ohnutí se nesmí dle ČSN EN ISO 15614-1 odstavce 7.4.3 v žádném směru vyskytnout ve zkušebním vzorku trhliny větší než 3mm.

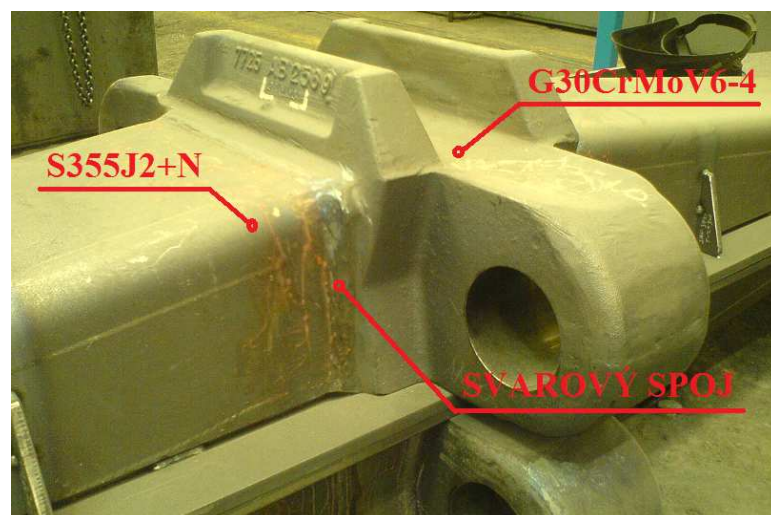
4. NÁVRH A PROVEDENÍ SVAROVÉHO SPOJE

Tento heterogenní svarový spoj dílce z S355J2+N a odlitku z G30CrMoV6-4 bude součástí ramene jeřábu pro manipulaci s kontejnery a těžkými břemeny.

Svařená součást je zobrazena na obrázcích 4.1 a 4.2.



Obr. 4.1. Svařovaný dílec



Obr. 4.2 Detail svařovaného dílce

4.1 Charakteristika materiálů

S355J2+N :

dle ČSN EN 10025-2: 2005 se jedná o jemnozrnnou nelegovanou konstrukční jakostní ocel. Svařitelnost je zaručená. Dle TNI CEN ISO/TR 15608 se řadí do skupiny 1.2.

Ocel je vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti svaru. Je účelné dbát doporučení, stanovující podmínky pro svařování, jak je například uvádí EC SC IC 2 (EN 1011). Tloušťka materiálu bude 10 mm.

Dřívější označení oceli bylo:

S355J2G4 podle EN 10025: 1990 +A1: 1993; St 52-3 N podle DIN 17100; 11 503 podle ČSN. [12]

Chemické složení materiálu S355J2+N je uvedeno v tabulce 4.1 a mechanické vlastnosti uvádí tab. 4.2.

Tab. 4.1. Chemické složení [hm. %]:

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	Al
max. 0,180	max. 1,600	max. 0,550	max. 0,035	max. 0,035	max. 0,300	max. 0,300	max. 0,300	0,02 - 0,08	min. 0,015

Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti:

Pevnost v tahu R_m [MPa]	490 - 630
Mez kluzu R_p [MPa]	345
Tvrdost HB	max. 225
Houževnatost KCU při -20°C [J]	min. 27

G30CrMoV6-4:

Vysokopevnostní ocel na odlitky pro všeobecné použití a konstrukce. Dle TNI CEN ISO/TR 15608 se řadí do skupiny 6.2.

Dřívější označení oceli bylo:

Dle ČSN EN 42 2767, nebo ISO 840-1033

Chemické složení základního materiálu G30CrMoV6-4 je uvedeno v tabulce 4.3. Mechanické vlastnosti uvádí tab. 4.4

Tab. 4.3 Chemické složení [hm. %]:

C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	V
0,28	0,73	0,53	0,009	0,002	0,31	1,42	0,075

Tab. 4.4 Mechanické vlastnosti: [13]

Pevnost v tahu R_m [MPa]	905
Mez kluzu R_p [MPa]	771
Tvrdość HB	250 - 300
Houževnatost KCU při -20°C [J]	45

4.2 Svařovací metoda

Před vlastní výrobou součásti vyobrazené na obr. 4.1 je nutné ověřit použitou metodu svařování a zvolený přídavný materiál. Proto budou nejdříve provedeny svary na zvlášť pro tento účel vyrobených zkušebních vzorcích.

Pro svařování zkušební vzorku jsem dle charakteru svařovaných materiálů, možností firmy a požadavků zákazníka zvolil metodu 135 dle ČSN EN ISO 4063. Princip metody a její výhody jsou uvedeny v teoretické části práce v odstavci 3.5.

4.3 Přídavný materiál

Pro tento svarový spoj jsem zvolil přídavný materiál G3Si1 dle ČSN EN 440. Průměr drátu je 1,2mm. Výrobce Esab tento materiál označuje OK AristoRod™ 12.50. Jedná se o nepoměděný svařovací drát nové generace. Je určený pro svařování většiny běžných nelegovaných konstrukčních ocelí především tam, kde jsou vyžadovány vysoké svařovací parametry a nejvyšší podávací rychlosti drátu, tj. i na mechanizovaných a robotizovaných pracovištích.

Chemické složení přídavného materiálu G3Si1 je uvedeno v tab. 4.5 a mechanické vlastnosti uvádí tabulka 4.6.

Tab. 4.5 Chemické složení G3Si1 [hm. %]:

C	P	S	Si	Mn	Cu
0,1	Max 0,025	Max 0,025	0,9	1,5	Max 0,300

Tab. 4.6 Mechanické vlastnosti G3Si1:

Pevnost v tahu R_m [MPa]	560
Mez kluzu R_p [MPa]	470
Tvrlost HB	170-250
Houževnatost KCU při -20°C [J]	45-65

Základní svařovací parametry drátu udávané výrobcem jsou uvedeny v tab. 4.7.

Tab. 4.7 Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty pro zvolený drát:

\varnothing (mm)	Proud I (A)	W	η	H	Podávací rychlost (m/min)	Napětí U (V)
1,2	120-380	18	97	1,3-8,0	2,5-15	18-35
W = Spotřeba plynu (l / min), η = Výtěžnost svarového kovu, g/100g drátu (%), H = Výkon navařování (kg/h)						

Podle charakteristik udávaných výrobcem je drát vhodný pro výrobu ocelových konstrukcí a umožňuje svařování ve všech svařovacích polohách. Lze svařovat jak v atmosféře směsného plynu Ar/ CO₂, tak i v čistém oxidu uhličitém.

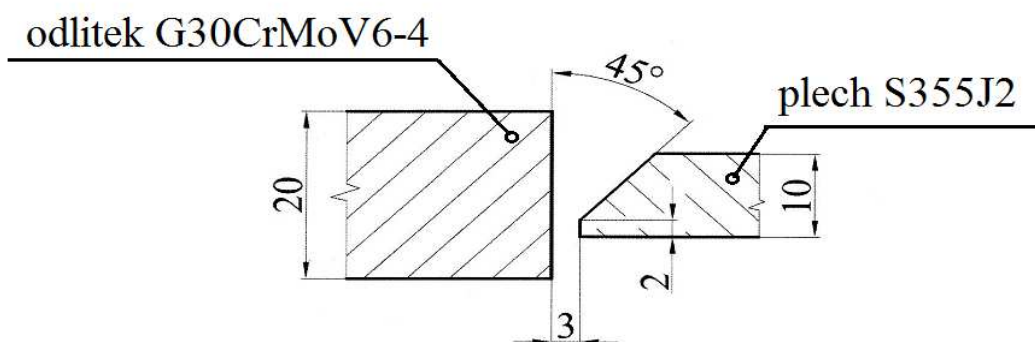
Pokyny pro bezpečné použití odpovídají předpisům (EC) No 1907/2006, ISO 11014-1 a ANSI Z400.1

4.4 Ochranná atmosféra

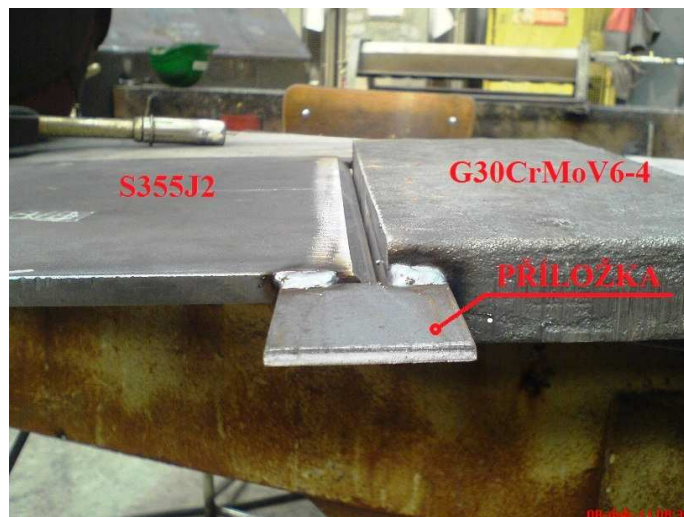
Vzhledem k parametrům přídavného materiálu G3Si1 byla zvolena směs výrobce Linde ve složení 80% Ar + 20 % CO₂. Tato směs je dle ISO 14175 uváděna pod označením M21.

4.5 Příprava svarových ploch

Svarové plochy jsou vysušeny, zbaveny kondenzátu a jiných látek, které by mohly ovlivnit kvalitu svaru, jak uvádí norma ČSN EN 1011-1. Na materiálu o tloušťce 10mm bude vyfrézován úkos s úhlem 45° dle ČSN EN ISO 9692-1, která uvádí tvary úkosů pro ruční svařování. Schematické označení svaru BW 1/2V. Budou přivařeny příložky z důvodu dodržení předepsané délky svaru. Příložky se po dokončení svařování mechanicky odstraní. Úprava svarových ploch je znázorněna v obrázku 4.3 a reálné zobrazení přípravy svarových ploch je na obr. 4.4.



Obr. 4.3 Úprava svarových ploch



Obr. 4.4 Frézované zkosení 45° na S355J2 a přivařeně příložky

4.6 Stanovení předehřevu

Výpočet uhlíkového ekvivalentu dle IIW je uveden v rovnici 4.1.

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\text{hm. \%}] \quad (4.1)$$

$$C_E = 0,763\%$$

Jelikož je výsledná hodnota uhlíkového ekvivalentu C_E 0,763 hm. % a tloušťka svařovaného materiálu je 20mm musíme přistoupit k předehřevu.

1, Výpočet teploty předehřevu dle Seferiana:

Výpočet ekvivalentního uhlíku C_c dle rovnice 4.2 a koeficientu vlivu ekvivalentního uhlíku a tloušťky materiálu C_p dle rovnice 4.3:

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo}{360} \quad [\text{hm. \%}] \quad (4.2)$$

$$C_c = 0,543$$

$$C_p = C_c + 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad [-] \quad (4.3)$$

$$C_p = 0,5973$$

Výsledná teplota přehřevu:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.4)$$

$$T_p = 206,26$$

2. Výpočet teploty přehřevu dle ČSN EN 1011-2 – metoda B:

Teplota přehřevu vzhledem k chemickému složení svarového kovu:

$$T_{pC_E} = 750 \cdot C_E - 150 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.5)$$

$$T_{pC_E} = 422,25$$

Teplota přehřevu vzhledem k tloušťce svařovaných materiálů:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tan\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.6)$$

$$T_{pd} = -108,4$$

Kde: d - tloušťka materiálu.

Teplota přehřevu vzhledem k obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu:

$$T_{pd} = 60 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.7)$$

$$T_{pd} = 54$$

Teplota přehřevu vzhledem k tepelnému příkonu:

$$T_{pQ} = (53 \cdot C_E - 32) \cdot Q - 53 \cdot C_E + 32 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.8)$$

$$T_{pQ} = -58,48$$

Výsledná teplota předehřevu dle ČSN EN 1011-2 – metoda B:

$$T_p = T_{pC_E} + T_{pd} + T_{pd} + T_{pQ} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.9)$$

$$T_p = 422,25 - 108,4 + 54 - 58,48$$

$$T_p = 309,37$$

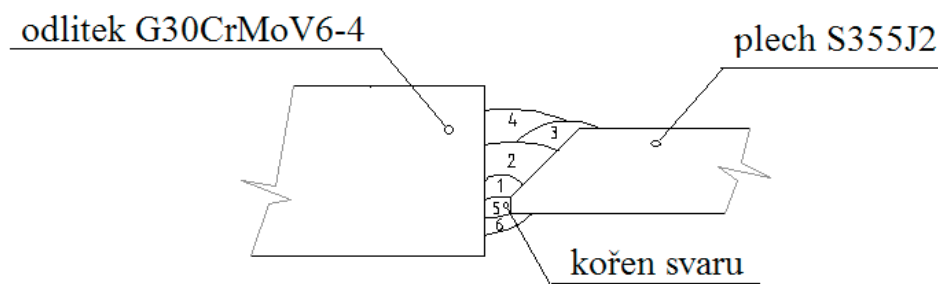
Teplotu předehřevu jsem počítal dle Seferiana viz. () a dle ČSN EN 1011-2 – metody B. Do rovnic jsem dosadil chemické složení materiálu G30CrMoV6-4 z tab. 4.3, protože má vyšší obsah uhlíku než materiál S355J2+N. Výpočet dle Seferiana stanovil předehřevu na 206,26 °C a výpočet dle ČSN EN 1011-2 – metody B na hodnotu 309,37 °C. Vzhledem k výsledným hodnotám teplot předehřevu a parametrům svařovaných materiálů volím předehřev na teplotu 250 °C zařízením pro plošný ohřev z důvodu zajištění rovnoměrného ohřevu v celém rozsahu zkušební vzorku. Zařízení spalující zemní plyn je znázorněno na obr. 4.5.



Obr 4.5 Předehřívací zařízení na zemní plyn

4.7 Provedení svaru

Svarové plochy připravené dle obr. 4.3 budou svařovány v poloze PA dle ČSN EN ISO 6947. Nejdříve se svaří housenka č. 1 bez průvaru kořene a poté následují další dle pořadí ve schématu 4.10. Je nutné dodržovat maximální předepsanou interpass teplotu 350°C. Po svaření housenek 1 až 5 se svařenec otočí, drážkuje se kořen svaru broušením a svaří se kořenová housenka 5 a krycí housenka 6. Housenky 5 a 6 jsou také svařovány v poloze PA. Schéma kladení svarových housenek je znázorněno na obr. 4.6. Hotový svarový spoj je na obrázku 4.7.



Obr. 4.6 Schéma kladení svarových housenek



Obr. 4.7 Hotový svarový spoj

Během svařování kontrolního spoje byly zaznamenány svařovací parametry jako teplota přehřevu, hodnota U, hodnota I, teplota interpass a rychlost svařování. Pro přehlednost jsou uvedeny v tabulce 4.8.

Tab. 4.8 Svařovací parametry při svařování kontrolního svarového spoje dle obr 4.3

Svarový spoj / housenka	Metoda svařování	Průměr drátu [mm]	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu / polarita	Tepelný příkon [kJ·mm ⁻¹]	Rychlost svařování [mm/s]	Interpass [°C]
1	135	1,2	137-145	19-20	DC/ +	0,7039	3,13	260
2	135	1,2	257-268	31-32	DC/ +	1,6538	4,00	282
3	135	1,2	256-263	30-31	DC/ +	0,8234	7,69	285
4	135	1,2	260-267	29,5-30,5	DC/ +	0,9699	6,52	-
Otočení svařence, drážkování kořene broušením								
5	135	1,2	255-260	29,5-30,5	DC/ +	0,8854	6,98	278
6	135	1,2	261-265	29,5-30,5	DC/ +	1,0716	5,89	-

Tepelný příkon Q jsem počítal dle rovnice 4.1

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4.1)$$

Kde: η - koeficient tepelné účinnosti dle příslušné metody svařování (pro metodu 135 je $\eta=0,8$)
 v - rychlost svařování [mm/s]

Svar byl proveden svářečem kvalifikovaným dle ČSN EN 287-1. Hodnoty uvedené v tab. 4.9 byly naměřeny kalibrovanými přístroji. Teplota přehřevu a teplota interpass byla měřena kontaktním teploměrem OMEGA HH22, proud a napětí multimetrem OMEGA HHM599.

Vzhledem k vysokému obsahu uhlíku v materiálu G30CrMoV6-4 volím pomalé ochlazování v termoizolačním zábalu po dobu 48 hodin.

4.8 Použitý svařovací zdroj

Byl zvolen KempoWeld 5500W s potřebným příslušenstvím, což je krokově řízený svařovací zdroj s oddělenou podávací jednotkou. Podáváč může být namontován na zdroji nebo samostatně na pracovišti s potřebnou délkou mezisvazku. Jedná se o špičkový stroj ve své třídě, co se týče výkonu, robustnosti konstrukce a jednoduchosti regulace výkonu. Je schopen pracovat s dvou, nebo čtyř kladkovým podavačem. Parametry zdroje jsou uvedeny v tab 4.9.

Tab. 4.9 Parametry zdroje KempoWeld 5500W

Sítové napětí [V]	380
Zatěžovatel 60%	550A/42V
100%	430A/36V
Rozsah parametrů [V]	18-56
Napětí naprázdno [V]	65
Účinník max. proudu	0.9
Účinnost max. proud %	87
Rozměry dxšxv s vodou [mm]	1075x480x1140
Hmotnost [kg]	194

5. NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY SVAROVÉHO SPOJE

Pro zkušební svarový spoj byly z nedestructivních zkoušek vybrány zkoušky vizuální, magnetická a zkouška ultrazvukem.

5.1 Vizuální zkouška

Tato metoda zjišťování defektů svarových spojů je dána normou ČSN EN 970, která byla také při kontrole dodržena. Vyhodnocení této metody pro ocel, nikl a titan se provádí dle ČSN EN ISO 5817. Tyto normy stanovují přesné provedení kontroly tak, abychom dosáhli odpovídajících hodnot. Přípustné a nepřípustné vady jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 6520-1. Parametry vizuální zkoušky jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Výřez záznamu o vizuální zkoušce

Podmínky vizuální zkoušky	
Kritéria přípustnosti	ČSN EN ISO 5817, Stupeň jakosti B
Prováděcí norma	ČSN EN 970
Rozsah kontroly	100 %
Zařízení použita pro kontrolu	Přídavné světlo, měrka svarů, lupa
Intenzita osvětlení	650 lx
Kontrola citlivosti	vyhovuje

Vizuální zkouškou dle ČSN EN ISO 5817 nebyly zjištěny nepřípustné vady.

5.2 Zkouška magnetická prášková

Zkouška byla provedena dle zkušebního postupu udaného ČSN EN ISO 17638 a vyhodnocena dle ČSN EN ISO 23278. Parametry zkoušky jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tab. 5.2 Parametry provedené magnetické zkoušky

Rozsah zkoušení [%]	100
Proud [A]	4
Druh magnetizace	El. mag. jho
Měrka	Bertholdova
Intenzita UV osvětlení	-
Teplota zkoušeného dílu [°C]	20

Vyhodnocením zjištěných výsledků nebyly dle ČSN EN ISO 23278 nalezeny žádné nepřipustné indikace.

5.3 Zkouška ultrazvukem

Zkušební postup je dán normou ČSN EN 1714 a hodnocení se provádí dle ČSN EN 1712.

Použit byl zkušební přístroj OLYMPUS EPOCH 600. Citlivost nastavena na hodnotu DAC – SDH, průměr 3 mm. Zkušební přístroj je na obr. 5.1. Parametry zkoušky a naměřené údaje uvádí tab. 5.3



Obr. 5.1 Zkušební přístroj OLYMPUS EPOCH 600 [16]

Tab. 5.3 Údaje z provedení zkoušky:

Sonda číslo / typ	1	2	3	Druh nastavení	1	2	3
	53475 MWB70N4	53477 MWB60N4	53476 MWB45N4		zPV	zPV	zPV
Změřený úhel [°]	70	60	45	Referenční úroveň	68	62	
Rozsah časové základny [mm]	100	100	-	Registrační úroveň	62	56	
Zesílení [dB]	68	62	-	Korekce přechod. ztrát	-	-	

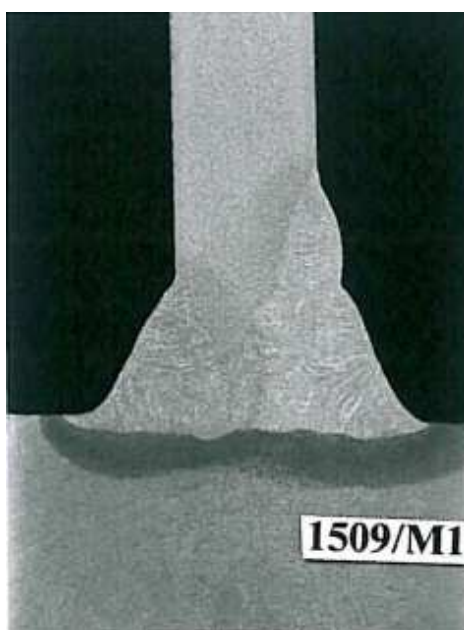
Při vyhodnocení zkoušek dle ČSN EN 1714 nebyly zjištěny žádné nepřipustné indikace.

6. DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY

Z destruktivních zkoušek mechanických vlastností byly pro tento svarový spoj vybrány zkoušky makrostruktury, tvrdosti, rázem v ohybu, tahem a lámavosti.

6.1 Zkouška makrostruktury

Povrch zkušebního vzorku svaru byl naleptán 15% HNO_3 a 2x zvětšen. Výsledná makrostruktura je na obr. 6.1.



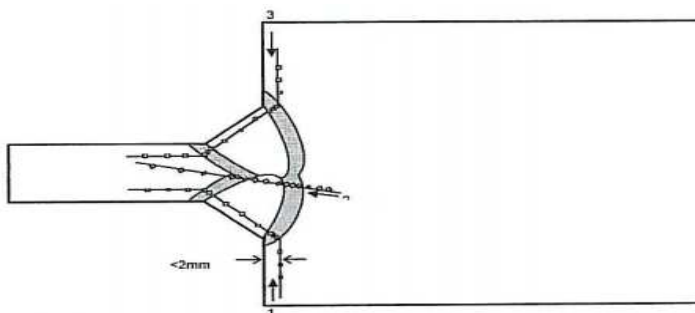
Obr. 6.1 Makrostruktura – leptáno 15% HNO_3 a dvakrát zvětšeno

Zkušební vzorek byl připraven dle ČSN EN 1321. Šířka teplem ovlivněné oblasti byla stanovena na max. 3,5mm, viz obr 6.1. Dle ČSN EN ISO 15614-1 odstavce 7.4.4 nebyly zjištěny žádné nepřípustné vady.

6.2 Zkouška tvrdosti svarového spoje

Zkouška tvrdosti svarového spoje byla provedena dle normy ČSN EN 1043-1. Měří se tvrdost dle Vickerse HV10 při teplotě 20°C.

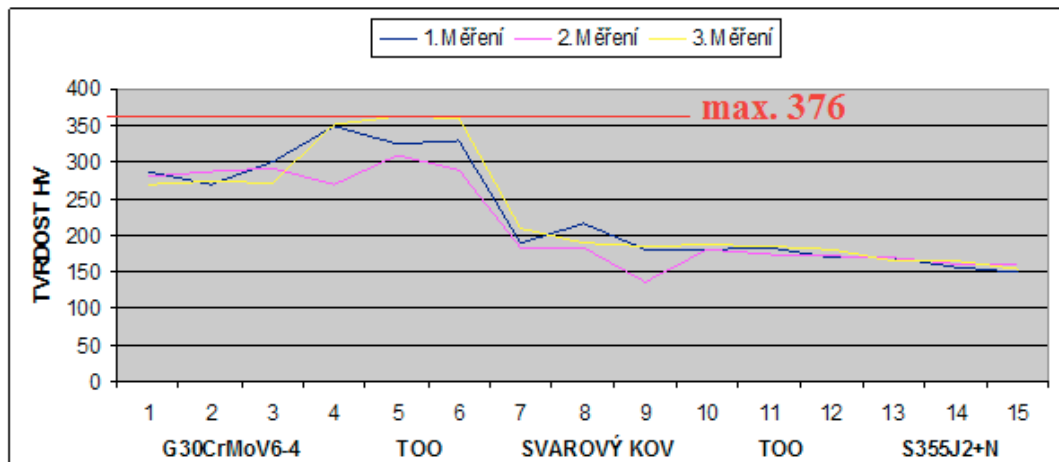
Rozmístění vtisků je znázorněno na obr. 6.2. Vtisky byly provedeny ve třech osách a jednotlivé hodnoty tvrdosti byly zaznamenány do tabulky 6.1 a graficky znázorněny v grafu 6.1.



Obr 6.2 Schematické znázornění rozmístění vtisků

Tab. 6.1 Naměřené hodnoty tvrdosti při teplotě 20°C

	TVRDOST HV 10															
	ZÁKLADNÍ MATERIÁL G30CrMoV6-4			TOO		SVAROVÝ KOV			TOO		ZÁKLADNÍ MATERIÁL S355J2+N					
						376				178					max. 376	
1.Měření	287	270	299	348	325	330	189	215	179	179	182	168	168	156	150	min. 150
						293				177						
						306				170					max. 322	
2.Měření	281	286	292	270	309	289	182	183	135	181	173	171	169	160	160	min. 135
						322				175						
						366				185					max. 366	
3.Měření	270	274	272	351	363	360	210	189	185	186	185	179	164	164	154	min. 154
						351				182						



Graf 6.1 Znázornění tvrdosti HV10 v jednotlivých oblastech svaru

Norma ČSN EN ISO 15614-1 uvádí jako maximální přípustnou hodnotu tvrdosti pro skupiny ocelí dle TNI CEN ISO/TR 15608 označovaných 1.2 hodnotu 380 HV10, pokud není jinak stanoveno doplňujícími dokumenty nebo požadavky odběratele. Skupina 6.2 nemá dle ČSN EN ISO 15614-1 určenu nejvyšší povolenou hodnotu tvrdosti. Nejvyšší naměřená hodnota ve zkušebním svaru je 376 HV10. Byla naměřena v TOO materiálu G30CrMoV6-4. Tvrdost svarového spoje je tedy vyhovující.

6.3 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena dle ČSN ISO 148 při teplotě -20 °C a jednotlivé parametry byly zaznamenány do tab. 6.2.

Tab. 6.2 Parametry zkoušky rázem v ohybu

	Rozměry zkušební tyče				Umístění vrubu	Typ tyče	Zkušební teplota [°C]	Nárazová práce [J]	
	Před zkouškou								
	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Průřez [mm²]	Délka [mm]					Průměrná hodnota [J]
Zkouška 1-3	7,5	10	70	-	VWT 0/2	KV ₂ 10x7,5	-20	72 50 54	58,7
Zkouška 4-6	7,5	10	70	-	VHT 2/2	KV ₂ 10x7,5	-20	40 44 43	42,4
Zkouška 7-9	7,5	10	70	-	VHT 2/2	KV ₂ 10x7,5	-20	22 19 12	17,7

Maximální energie námi použitého kladiva je 300 J.

Zkušební vzorky pro zkoušku rázem v ohybu jsou odebírány z různých oblastí svaru. Značení a výběr míst pro umístění vrubu ve zkušebním vzorku udává norma ČSN EN 875.

Zkouška rázem v ohybu byla provedena dle ČSN ISO 148. Dle ČSN EN ISO 15614-1 odstavce 7.4.5 musí být minimální hodnota nárazové práce vyšší, než nejnižší hodnota nárazové práce obou svařovaných materiálů. V tomto případě se jedná o hodnotu 27 J materiálu S355J2+N. Nejnižší naměřená průměrná hodnota je v TOO odlitku, a to 17,7 J. Při této zkoušce však byla použita zkušební tělíska nestandardních rozměrů 10x7,5 mm a po konzultaci se zákazníkem jsou výsledky zkoušky vyhovující.

6.4 Zkouška tahem

Odebírání vzorků ze svarového spoje bylo provedeno dle ČSN EN 895. Zkouška byla provedena dle ČSN EN ISO 6892-1, ČSN EN 895. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.3.

Tab. 6.3 Parametry zkoušky tahové

	Rozměry zkušební tyče Před zkouškou Po zkoušce				Zkušební teplota	Mez pevnosti v tahu R _m / místo přerušení
	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Průřez [mm ²]	Délka [mm]	[°C]	[MPa] / -
Zkouška 1	7,20 -	25 -	180 -	-	20	529 Mimo svar (SJ355J2+N)
Zkouška 2	7,20 -	25 -	180 -	-	20	523 Mimo svar (SJ355J2+N)

Zkouška tahem je hodnocena dle ČSN EN ISO 15614-1, která uvádí, že pevnost svarového spoje u různorodých materiálů nesmí být nižší, než minimální hodnota specifikovaná pro základní materiál s nejnižší pevností v tahu.

U zkoušeného svarového spoje má nejnižší hodnotu pevnosti v tahu materiál S355J2+N, a to přibližně 510 MPa. Při zkouškách došlo k porušení v oblasti základního materiálu S355J2+N a to při hodnotách vyšších než je mez pevnosti základního materiálu uvedená v tab. 4.2. Svarový spoj je tedy vyhovující.

6.5 Zkouška lámavosti

Rozměry zkušebních vzorků a naměřené hodnoty ze zkoušky lámavosti jsou uvedeny v tab. 6.4.

Tab. 6.4 Parametry zkoušky lámavosti

Rozměry zkušební tyče Před zkouškou Po zkoušce				Zkouška lámavosti				
				Typ tyče	Průměr ohýbacího trnu	Vzdálenost mezi válečky	Úhel ohybu	Druh a rozměry zjištěných vad
Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Průřez [mm ²]	Délka [mm]		[mm]	[mm]	[°]	[mm]
5,50 -	30,0 -	-	400,0 -	Kořen	40	57	180	Bez trhlin
7,00 -	30,0 -	-	400,0 -	Kořen	51	75	180	Bez trhlin
7,00 -	30,0 -	-	400,0 -	Povrch	51	75	180	Trhlina 1,9 ; 1mm
5,50 -	30,0 -	-	400,0 -	Povrch	40	57	180	bez trhlin

Zkouška lámavosti byla provedena dle ČSN EN ISO 5173 při úhlu ohybu 180° a vyhodnocena dle ČSN EN ISO 15614-1 odstavce 7.4.3. Během zkoušení se vyskytly trhliny pouze u třetího měření a to jedna o délce 1 mm a druhá měla délku 1,9 mm. Dle normy je tedy svarový spoj vyhovující, protože trhliny v jakémkoliv směru nepřesáhly hodnotu 3 mm.

7. ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce je v první řadě utvořit základní přehled v problematice svažitelnosti uhlíkových ocelí. Je vysvětlen pojem svažitelnost ocelí, pojem uhlíková ocel a popsány základní parametry, které je potřeba brát v úvahu při řešení této problematiky. Jsou rovněž uvedeny základní prvky nejčastěji obsažené v ocelích a jejich vlivy na svažitelnost. Z této studie vyšlo najevo, že nejdůležitějším prvkem ovlivňujícím tavné svaření dvou základních materiálů je uhlík. Respektive hodnota ekvivalentního uhlíku, která bere v potaz i vliv dalších obsažených prvků, tedy je jakýmsi komplexním shrnutím. V práci jsou uvedeny tři nejběžnější metody jeho výpočtu. Čím je tato výsledná hodnota vyšší, tím obtížnější bude zhotovení vyhovujícího svarového spoje a my budeme muset volit příslušná opatření.

Praktická část práce se zabývá svarovým spojem lité oceli G30CrMoV6-4 a tvářené oceli S355J2+N. V odstavci 4.1 jsou uvedeny základní materiálové charakteristiky a oblasti použití obou materiálů. Vzhledem ke svařovaným materiálům byla vybrána svařovací metoda 135. S ní souvisí i volba příslušného přídavného materiálu G3Si1 a ochranné atmosféry M21 dle ČSN ISO 14175. Rovněž byla provedena i kontrola nutnosti přehřevu, na jejím základu stanovena teplota přehřevu a parametry ochlazování. Poté následuje návrh přípravy svarových ploch a určení způsobu a pořadí kladení svarových housenek včetně dodržování teploty interpass.

Po vyhotovení samotného svarového spoje byly navrženy a uskutečněny nedestruktivní a destruktivní zkoušky svarového spoje. Zkoušky byly provedeny dle příslušných norem a vyhodnoceny dle ČSN EN ISO 14614-1. Jako první nedestruktivní zkouška se provedla zkouška vizuální. Tou nebyly zjištěny žádné nepřípustné vady. Další byla zkouška magnetická prášková. Ani touto zkouškou nebyly zjištěny žádné nepřípustné indikace. Zkouška ultrazvukem je také vyhovující. Co se týče nedestruktivních zkoušek, tak žádnou zkouškou nebyly nalezeny nepřípustné vady nebo indikace.

Z destruktivních zkoušek byla jako první uskutečněna makrostrukturní zkouška. Povrch vzorku byl leptán 15% HNO_3 a po dvojnásobném zvětšení nebyly zjištěny žádné nepřípustné vady. U zkoušky tvrdosti byla maximální naměřená hodnota tvrdosti 376 HV10 a to v TOO základního materiálu G30CrMoV6-4. Maximální hodnota HV10 stanovená normou ČSN EN ISO 15614-1 pro skupiny oceli 1.2 a 6.2 je 380 HV10 u skupiny 1.2, protože skupina 6 nemá maximální hodnotu HV10 definovanou. Tvrdost svarového spoje je tedy vyhovující. Další zkouškou byla zkouška rázem v ohybu. Norma

ČSN EN ISO 15614-1 odstavce 7.4.5 udává, že minimální hodnota naměřené nárazové práce musí být vyšší, než nejnižší hodnota nárazové práce obou svařovaných materiálů. Materiál S355J2+N má hodnotu nárazové práce 27 J. Naše nejnižší průměrná hodnota naměřené nárazové práce je 17,7 J v TOO materiálu G30CrMoV6-4. Protože se nejedná o tvářený materiál, tedy nemá vlákna po tváření, a z důvodu použití nestandardních zkušebních tělísek a po konzultaci těchto skutečností se zákazníkem byla tato hodnota označena za vyhovující. U tahové zkoušky došlo k porušení mimo oblast svaru a to při obou měřeních v oblasti základního materiálu S355J2+N při hodnotách vyšších, než je mez pevnosti materiálu S355J2+N. Tahová zkouška je tedy vyhovující. U poslední zkoušky, zkoušky lámavosti je dáno normou, že se nesmí vyskytnout trhliny větší než 3 mm v jakémkoliv směru. Zjištěné trhliny při ohybu zkušebního vzorku o předepsaných 180° měly pouze 1 a 1,9 mm. Zkouška lámavosti je tedy vyhovující.

Na základě všech vyhovujících výsledků byl akreditovanou zkušební organizací zpracován protokol WPQR a svarový spoj může být použit v dané konstrukci při dodržení svařovacích podmínek a parametrů uvedených v tabulce 4.8.

Seznam použité literatury:

- [1] KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír ; HAJDÍK, Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava 2009. Ostrava : Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, 2009. 241 s.
- [2] *Ateam.zcu.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-04-27]. Ateam.zcu.cz/download. Dostupné z WWW: <http://ateam.zcu.cz/download/Precipitace09_10.pdf>.
- [3] *Svarinfo.cz* [online]. 2006 [cit. 2011-04-27]. Svarforum.cz. Dostupné z WWW: <<http://svarbazar.cz/phprs/index.php>>.
- [4] SÉFERIAN, D. *Nauka o kovech a svařování ocelí*. přeložil Inž. Jiří Bernas, doplnil Inž. Karel Lobl, Csc. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 422 s.
- [5] *Doporučení vypracovaná XI. komisí IIS/IIW : Component des métaux du point vue du soudage (Chování kovů z hlediska svařování)*. Soud. et tech. Conn. : Soud. et tech. Conn., 1956. 153 s.
- [6] *Wikipedie* [online]. 2001 [cit. 2011-04-27]. Wikipedie.infostar.cz. Dostupné z WWW: <http://wikipedie.infostar.cz/c/ca/carbon_steel.html>.
- [7] *Wikipedie* [online]. 2011, 2011 [cit. 2011-04-27]. Wikipedie.org. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Martenzit>>.
- [8] Svařitelnost uhlíkových, mikro a nízkolegovaných ocelí pro tlaková zařízení. In [online]. Kladno : První železářská společnost Kladno, s.r.o., 2008, 2009 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW:<<http://www.allforpower.cz/clanek/svaritelnost-uhlikovych-mikro-a-nizkolegovanych-oceli-pro-tlakova-zarizeni/>>.
- [9] KOUKAL, Jiří. *Sborník referátů TLAK 2007 : Charakteristika ocelí pro tlaková zařízení, jejich svařitelnost a degradace vlastností*. Libeznice, Praha : Medium s.r.o., 2007. 150 s.
- [10] KOUKAL, Jiří; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I. : skripta VŠB – TU Ostrava*. Ostrava : [s.n.], 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6.
- [11] *Ferrosteel* [online]. 2010. 2011 [cit. 2011-04-27]. Czferrosteel.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.czferrosteel.cz/cze/11503.htm>>.
- [12] *Priruckabolzano.cz* [online]. 1998, 2004 [cit. 2011-04-27]. Technická podpora. Dostupné z WWW: <<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/EN10025/>>.
- [13] *Http://www.perucchini.com* [online]. 2011. Italia-Omegna : 2011 [cit. 2011-04-27]. [Http://www.perucchini.com/fra/releases](http://www.perucchini.com/fra/releases). Dostupné z WWW: <<http://www.perucchini.com/fra/releases/PSP09.pdf>>.

- [14] *Svarinfo.cz* [online]. 2011, 2011 [cit. 2011-04-27]. Svarforum.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.svarforum.cz/forum/viewtopic.php?id=786>>.
- [15] Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I : Hodnocení kvality svarového spoje. In [online]. [s.l.] : ČVUT, 2010, 2010 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf>.
- [16] *Olympus : Products* [online]. 30 Tech Valley Dr Suite 102, East Greenbush : 1999, 2011 [cit. 2011-05-07]. Company profile. Dostupné z WWW: <<http://www.globalspec.com/Supplier/Profile/OlympusNDT?comp=2975>>.
- [17] Česká Republika. Česká technická norma : Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část I: Obloukové a plamenné svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu. In *EN ISO 15614-1:2004*. 2005, kapitola 9 , příloha A, s. 32. Dostupný také z WWW: <<http://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>>.

Seznam obrázků, tabulek a grafů:

Seznam obrázků:

Obr. 3.1. Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO [1]

Obr. 3.5 Svařování metodou 135 (MAG) [15]

Obr. 3.6 Schematické znázornění vzdálenosti konce průvlaku a polohy hubice

Obr. 3.7 Vzniklý rozptylový tok [10]

Obr. 3.8 Shluk feromagnetických částic vyznačujících místo vady [17]

Obr. 4.1. Svařovaný dílec

Obr. 4.2 Detail svařovaného dílce

Obr. 4.3 Úprava svarových ploch

Obr. 4.4 Frézované zkosení 45° na S355J2 a přivařené příložky

Obr. 4.5 Předehřívací zařízení na zemní plyn

Obr. 4.6 Schéma kladení svarových housenek

Obr. 4.7 Hotový svarový spoj

Obr. 5.1 Zkušební přístroj OLYMPUS EPOCH 600 [16]

Obr. 6.1 Makrostruktura – leptáno 15% HNO₃ a dvakrát zvětšeno

Obr. 6.2 Schematické znázornění rozmístění vtisků

Seznam tabulek:

- Tab. 3.1 Teplota přehřevu pro oceli s obsahem C vyšším než 0,2 hm % [1]
- Tab. 3.2 Maximální kombinovatelná tloušťka svařovaná bez přehřevu [8]
- Tab. 4.1 Chemické složení [hm. %]:
- Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti: [13]
- Tab. 4.3 Chemické složení [hm. %]:
- Tab. 4.4 Mechanické vlastnosti:
- Tab. 4.5 Chemické složení G3Si1 [hm. %]:
- Tab. 4.6 Mechanické vlastnosti G3Si1:
- Tab. 4.7 Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty pro zvolený drát:
- Tab. 4.8 Svařovací parametry při provedení svaru dle obr. 4.10
- Tab. 4.9 Parametry zdroje KempoWeld 5500W
- Tab. 5.1 Výřez záznamu o vizuální zkoušce
- Tab. 5.2 Parametry provedené magnetické zkoušky
- Tab. 5.3 Údaje z provedení zkoušky:
- Tab. 6.1 Rozpis naměřených tvrdostí v místech vtisku při teplotě 20°C
- Tab. 6.2 Parametry zkoušky rázem v ohybu
- Tab. 6.3 Parametry zkoušky tahové
- Tab. 6.4 Parametry zkoušky lámavosti

Seznam grafů:

- Graf 6.1 Znázornění tvrdosti HV10 v jednotlivých oblastech svaru